Augenmodell

Versuchsziele:
Physikalisch:
Verständnis von optischen Abbildungen mit Linsen - vergrößert/verkleinert, reelle/virtuelle Bilder, Linsenfehler, einfache optische Instrumente (Lupe, Mikroskop)
Medizinisch:
Aufbau des Auges und des damit verbundenen komplexen Bildverarbeitungsprozesses, Augenfehler (Hintergrund mit physikalischer Erklärung) und deren Korrekturmöglichkeiten durch Konkav-/Konvexlinsen

Versuchsvorbereitung:
Kenntnisse über geometrische Optik, (dünne) Linsen, Konstruktion von Strahlengängen mit Konkav- und Konvexlinsen, Abbildungsgleichung und Abbildungsmaßstab, Brechung, Linsensysteme, Linsenfehler

1 Einleitung

1.1 Der Sehvorgang

Der Sehvorgang kann in zwei funktionelle Schritte unterteilt werden. Im ersten erzeugt der „optische Apparat“ des Auges ein reelles, verkleinertes, umgekehrtes Bild des betrachteten Gegenstandes. Dieser Aufbau besteht aus den Hauptbestandteilen Hornhaut, Linse, Glaskörper, Iris und Netzhaut. Die Netzhaut ist Ausgangspunkt des zweiten Schrittes. Sie ist mit Photorezeptoren durchzogen, welche die Lichtverteilung des erzeugten Bildes in elektrische Signale umwandeln; diese werden wiederum zu Informationen in der Netzhaut bzw. im Gehirn verarbeitet.
Der erste Teil des Sehvorganges kann experimentell dargestellt werden und soll Inhalt dieses Praktikumsversuchs sein. Mit dem stark vereinfachten Versuchsaufbau wird die Bildentstehung im Auge untersucht und die Korrektur einiger wichtiger Sehfehler bzw. Augenkrankheiten simuliert.
Für ein besseres Verständnis des Prozesses sollen weitere Vereinfachungen eingeführt werden:
Hornhaut und Augenlinse bilden real ein sogenanntes System von dicken Linsen, was aber eine erschwerte Berechnung der Parameter darstellt (2 optische Hauptachsen, usw.). Hier sollen diese beiden Teile vereinfacht ein System dünner Linsen darstellen, was eine einfache Addition der Brechkräfte zur Folge hat.
Vernachlässigt werden ebenso die Tiefendimension der Objekte und stereoskopisches Sehen.

1.2 Grundlagen zur optischen Abbildung

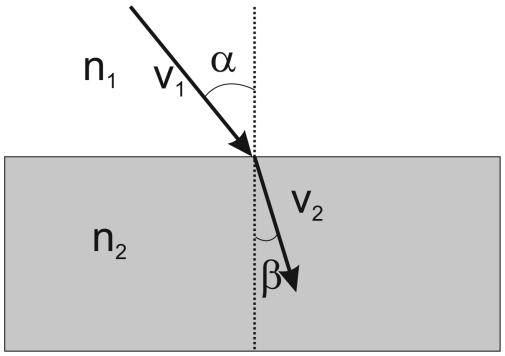

Abbildung 1: Übergang von optisch dünnerem (n_1) zu optisch dichterem Medium ($n_2 > n_1$).

Unter einer optischen Abbildung versteht man die Verteilung heller, dunkler und farblich unterschiedlicher Punkte eines Objektes mittels einer optischen Einrichtung, durch die maßstabsgerecht ein Bild an einem anderen Ort entsteht. Dabei vereinen sich alle von einem Punkt des Objektes ausgehenden Lichtstrahlen in einem Punkt des Bildes. Dies wird bei allen Linsensystemen (so auch beim Auge) durch Brechung an Grenzflächen erreicht, die eine nötige Richtungsänderung der Lichtstrahlen ermöglichen. Die

Brechung an Grenzflächen ist die Folge unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Lichtes in den verschiedenen Medien, die eine unterschiedliche Brechzahl besitzen (Abb. 1).
Der Zusammenhang der Richtungsänderung des Lichts und den Brechzahlen bzw. Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den Materialien wird durch das *Brechungsgesetz von Snellius* (Gl. 1) beschrieben.

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2};; \quad n_1 = \frac{c_0}{v_1}; \quad n_2 = \frac{c_0}{v_2}; \text{bzw. } n_1 \sin\alpha = n_2 \sin\beta. \tag{1}$$

n_1, n_2: Brechzahlen
v_1, v_2: Lichtgeschwindigkeit im Medium
c_0: Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
$c_0 = 299\,792\,458$ m/s $\approx 3 \cdot 10^8$ m/s

2 Aufbau des Auges

Abbildung 2 zeigt schematisch den Aufbau des menschlichen Auges. Die wichtigen Bestandteile für den Sehvorgang werden im Folgenden kurz beschrieben.

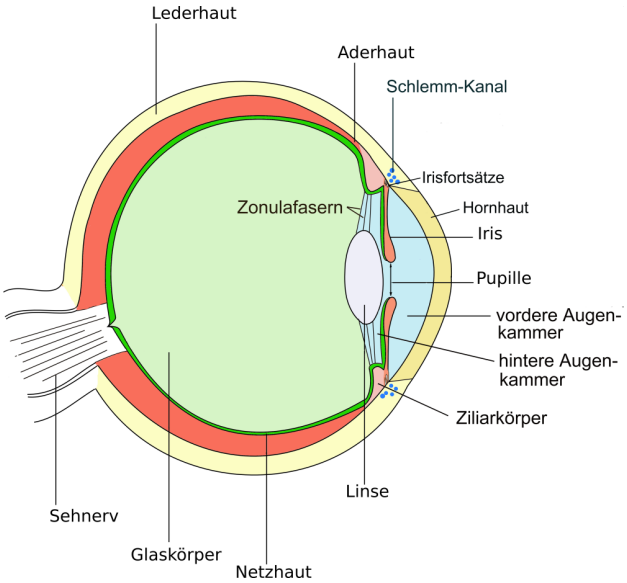

Abbildung 2: Schematischer Aufbau des menschlichen Auges.

2.1 Hornhaut (Cornea)

Durch die Grenzschichtlage (Luft/Gewebe) liefert die Hornhaut den Hauptanteil der Brechkraft (ca. 43 dpt[1]). Die Brechzahl für Luft beträgt $n = 1$, die für Gewebe (Wasser) $n = 1{,}336$. Die halbkugelförmige Form der Hornhaut bewirkt eine Anpassung der Brechkraftdifferenz zwischen Luft und Gewebe, um aufgrund der anatomischen Verhältnisse (Augenlänge) eine scharfe Abbildung auf die Netzhaut darstellen zu können.

2.2 Regenbogenhaut (Iris)

Durch Muskelkontraktion kann die Irisöffnung (Pupille) in ihrem Durchmesser variiert werden (1-8 mm), was für die Akkommodation (= Entfernungseinstellung) und Adaption (= Anpassung der Empfindlichkeit auf die Helligkeit) wichtig ist.

[1] dpt = Dioptrie (= m^{-1}), Einheit der Brechkraft D = 1/f, d.h. eine Linse mit 1 m Brennweite besitzt die Brechkraft 1 dpt.

2.3 Augenlinse (Lens cristallina)

Die Linse besteht überwiegend aus Wasser (ca. 70 %) und hat einen inhomogenen zwiebelschalenähnlichen Aufbau, d. h. sie besitzt einen etwas härteren Kern mit höherer Brechzahl (n = 1,4) und eine weichere Rinde (n = 1,34).Die Augenlinse hat eine bikonvexe Form, deren Krümmungen jedoch unterschiedlich sind.
Die Hauptaufgabe der Linse ist eine scharfe Abbildung auf der Netzhaut zu gewährleisten. Aufgrund der unterschiedlichsten Gegenstandsweiten und der anatomisch festgelegten Bildweite, kann dies nur durch Variation der Brennweite erreicht werden. Der Ringmuskel (Ziliarmuskel) verändert die Krümmung der Linse und somit die Brennweite durch Kontraktion. Diese sogenannte Akkommodation kann eine Einstellung von weit (∞) entfernten Gegenständen (flachste Linsenkrümmung) bis zu einem altersbedingten Nahpunkt (größte Linsenkrümmung) variieren. Die Linse steuert für die Abbildung eine (variable) Brechkraft zwischen etwa 19 - 33 dpt bei. (Wie groß sollte demnach sinnvollerweise der Augendurchmesser bzw. der Abstand von Linse zur Netzhaut sein?)

2.4 Kammerwasser/Glaskörper

Wie der erste Name bereits andeutet bestehen beide Medien trotz unterschiedlicher Konsistenz (Kammerwasser = flüssig, Glaskörper = gallertartig) überwiegend (99%) aus Wasser. Beide Bestandteile tragen ebenso zur Bilderzeugung, wenn auch geringfügiger, bei, wie auch Linse oder Hornhaut.

2.5 Netzhaut (Retina)

Das Bild von Gegenständen wird durch die vorhergehenden Bestandteile auf die Netzhaut abgebildet. Die Netzhaut stellt eine gewölbte Mattscheibe mit unterschiedlichen Erkennungsbereichen dar. Die Bildweite ist aufgrund der Augenlänge anatomisch festgelegt. Die Netzhaut besteht neben anderen Zellschichten überwiegend aus photosensorischen Zellrezeptoren, die sich in zwei Gruppen unterteilen lassen: Zäpfchen, die farbempfindlich sind und für die Helladaption zuständig sind. Stäbchen, die bei der Dunkeladaption eine größere Rolle spielen.
Auf der Netzhaut sind unterschiedliche Erkennungsbereiche vorhanden mit verschiedenen Eigenschaften:
Gelber Fleck (Fovea centralis) - hier liegt die Stelle des schärfsten Sehens.
Blinder Fleck (Mariote Fleck) - die Anbindung zum Sehnerv.

3 Bildentstehung im Auge

Der Bildverarbeitungsprozess im Auge und im zentralen Nervensystem ist äußerst komplex und läßt sich nur vereinfacht darstellen. Die am Ablauf beteiligten Komponenten sind einzeln betrachtet äußerst ineffizient und physikalisch betrachtet sehr ungenau, als System und infolge ausgeklügelter Komprimierungsvorgänge jedoch das beste optische Instrument.
Als einfachste Aussage muß man sich die Bilddarstellung auf der Netzhaut, wie bei einer Konvexlinse als Darstellung eines *umgekehrten* und stark *verkleinerten* Bildes vorstellen (Abb. 3).

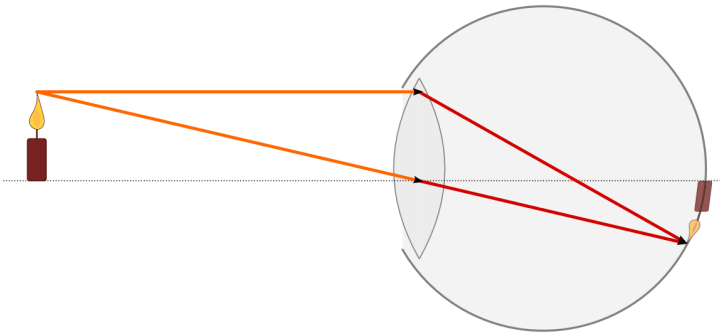

Abbildung 3: Prinzip der Bilddarstellung auf der Netzhaut.

4 Augenfehler

4.1 Normalsichtig (Emmetropie)

Als *emmetrop* bezeichnet man ein Auge dann, wenn es im nicht akkommodierten Zustand in sehr großen Entfernungen scharf sieht.

4.2 Kurzsichtig (Myopie)

Entfernte Gegenstände können trotz Fernakkomodation (die Linse ist dabei entspannt, hat also ihre niedrigste Brechkraft) nicht scharf abgebildet werden.

1. Grund: Das Auge ist zu lang im Vergleich zum brechenden System, d.h. die Bildweite b ist zu kurz (Abb. 4, oben).
2. Abhilfe: Konkavlinsen verlängern die Brennweite der Linse (bzw. Konkavlinsen reduzieren die Brechkraft; Abb. 4 unten): bis b_{max} kann der Betroffene scharf sehen d.h. bei $g \to \infty$ wird es bei b_{max} abgebildet.

$$\Rightarrow f = -b_{max} \tag{2}$$

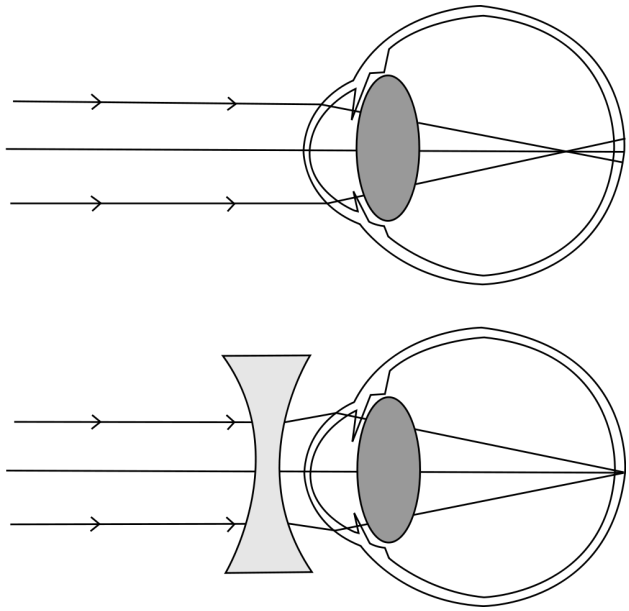

Abbildung 4: Kurzsichtiges Auge (zu lang) und die Korrektur durch eine (Bi-)Konkavlinse.

4.3 Weitsichtig (Hyperopie)

Die Akkomodation reicht im Nahbereich nicht aus.

1. Grund: das Auge ist zu kurz, d.h. die Bildweite b ist zu lang (Abb. 5, oben)
2. Abhilfe: Konvexlinsen erhöhen die Brechkraft und verkürzen daher die Bildweite b (Abb. 5, unten)

Für die Brennweite f der Konvexlinse gilt:
d_{min} ist die minimale Entfernung, bei der noch scharf gesehen wird. Es gilt $d_{max} > d_0$ (d_0 ist die minimale Entfernung beim normalsichtigen Auge). Für ein Objekt G in der Entfernung d_0 muß ein virtuelles Bild in d_{min} erzeugt werden.

$$\Rightarrow g = d_0;\ b = -d_{min} \ \Rightarrow f = \frac{d_{min}}{d_{min} - d_0} d_0 \tag{3}$$

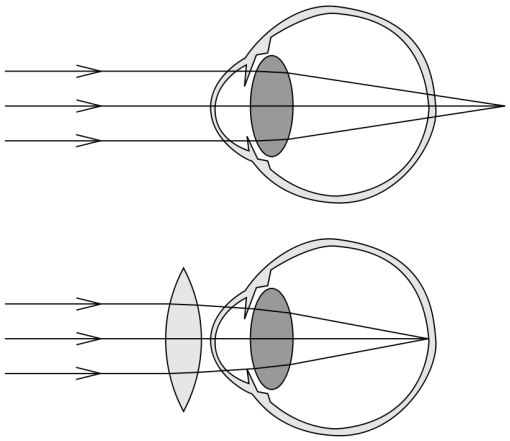

Abbildung 5: Weitsichtiges Auge; Korrekturmöglichkeit durch Bikonvexlinse.

4.4 Altersweitsichtigkeit (Presbyopie)

Ab dem 30. Lebensjahr bildet sich in der Augenlinse ein Kern mit höherer Brechzahl (n = 1,4) im Vergleich zur weicheren Rinde (n = 1,34). Mit zunehmenden Alter dehnt sich der Kern immer weiter nach außen aus. Die Linse wird dadurch weniger elastisch, was eine Akkomodation (siehe Abb. 6) zunehmend erschwert. Der Nahpunkt für scharfes Sehen rückt somit immer weiter weg („Die Arme werden zu kurz zum Zeitunglesen“).

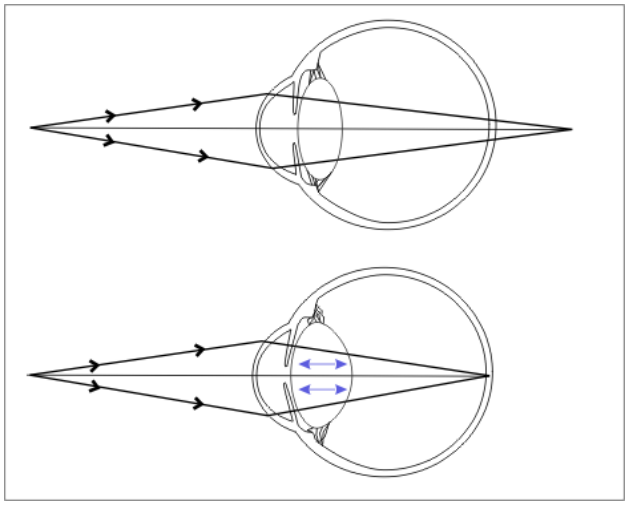

Abbildung 6: Durch die Akkomodation der Linse werden auch Gegenstände, die nahe am Auge liegen, scharf abbgebildet. Den kleinsten Abstand, unter dem man noch scharf sieht bezeichnet man als Nahpunkt. Dieser liegt bei Jugendlichen bei etwa 10 cm und kann im hohen Alter (> 70 Jahre) bis zu einigen Metern betragen, was einer nahezu starren Linse entspricht.

5 Versuchsdurchführung

Der Versuchsaufbau besteht aus einer optischen Bank, auf der die diversen Elemente auf verschiebbaren Reitern montiert und in der Höhe variabel angeordnet werden können. Bei allen Versuchen ist darauf zu achten, dass alle Abbildungselemente mit ihren Zentren eine durchgehende horizontale Achse bilden. Die Qualität der realisierten Abbildungen hängt entscheidend von der Justage dieser optischen Achse ab. Zur besseren Justierung ist bei allen Linsen sowie bei der Irisblende die Höhe des Zentrums am Rande der Linsenfassung markiert, so dass die Höhenausrichtung aller Elemente mittels Lineal exakt vorgenommen werden kann. Alle optischen Elemente sind so gehaltert, dass eine Einstellung der optischen Achse bei 15,0 $\pm$ 1,0 cm oberhalb der optischen Bank gewährleistet ist.

Konstruktionsbedingt sind die Hauptebenen der Linsen nicht in der Mitte der jeweiligen Linsenfassung und damit auch nicht über der Zentralachse von Haltestift und Stativhülse. Die Verschiebung der Linsenhauptebenen (d.h. der Linsenmitten) gegenüber der Zentralachse der Stativhülsen ist für jede Linse auf dem oberen Rand der Fassung vermerkt. Ferner sind die Stativhülsen, die einen Durchmesser von 25,0 mm besitzen, jeweils endbündig auf den Reitern montiert. Damit können die Endflächen der Reiter als Ablesemarken mit einem genau definierten horizontalen Abstand zum Zentrum der jeweiligen Linse benutzt werden. Die Positionen dieser Marken können dann mit einer Genauigkeit von ca. $\pm$1,0 mm auf der am unteren Rand der optischen Bank angebrachten Längenskala abgelesen werden (Parallaxenfehler beachten!).

Die abzubildenden Objekte sind in Diarahmen montiert, die in einen Doppel-Filterhalter geklemmt werden können. Die beiden Schächte des Filterhalters sind dabei azentrisch auf dem Haltestift montiert, um eine Annäherung zwischen Objekt und Linse von bis ca. 13 mm zu erlauben. Der horizontale Versatz der Objektebenen in den beiden Schächten gegenüber dem Zentrum der Haltestiftes beträgt 15,0 mm bzw. 21,0 mm. Für einige Versuchsteile, insbesondere bei der Behandlung der Linsenkombination aus Sammel- und Zerstreuungslinse ist es wichtig, die optischen Elemente so nah wie möglich hintereinander zu positionieren. Zu diesem Zweck gibt es bei jedem Versuchsaufbau einen Doppel-Linsenhalter, bei dem zwei Stativhülsen auf denselben Reiter montiert sind. Die beiden Hülsen sind dafür an den Berührungsflächen jeweils um 5,0 mm abgefräst. Das Photo in Abbildung 7 verdeutlicht noch einmal die geometrischen Verhältnisse.

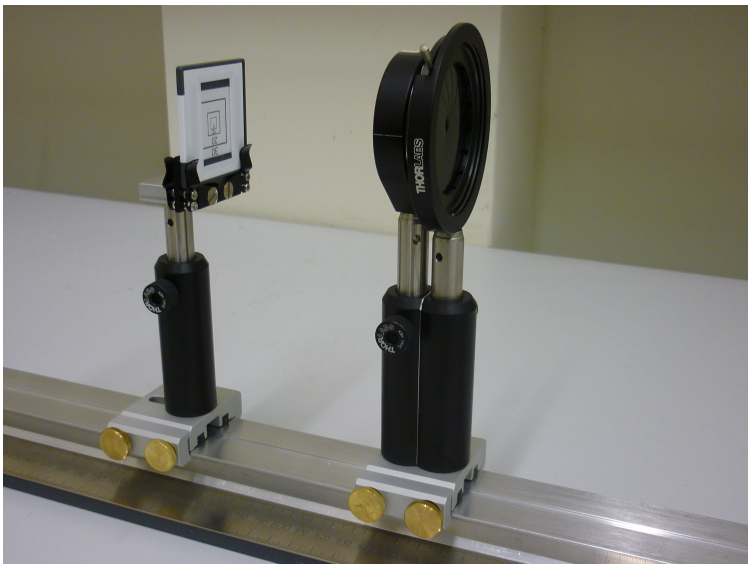

Abbildung 7: Montage von Linsen und Objekten auf der optischen Bank. Gezeigt ist die Montage im Doppel-Filterhalter und im Doppel-Linsenhalter.

6 Aufgaben

6.1 Brennweitenbestimmung von Linsen

1. Die Linsen L1 bis L6 sind mit einer Ausnahme Sammellinsen. Überlegen Sie sich ein einfaches Verfahren, um die eine Zerstreuungslinse zu identifizieren!

2. Bestimmen Sie (in Absprache mit dem Tutor) für eine Sammellinse die Brennweite, indem Sie eine scharfe reelle Abbildung realisieren. Bestimmen Sie für jede Abbildung die Brennweite der Linse mit Hilfe der Abbildungsgleichung. Benutzen Sie als Objekt jeweils das transparente Rahmenmuster und fangen Sie das Bild auf der weißen Mattscheibe (ohne cm-Skala) auf.

3. Vermessen Sie die Linse L6 genauer, indem Sie eine vergrößernde und eine verkleinernde Abbildung durchführen. Bei verkleinernden Abbildungen gelingt die Scharfstellung bei Verwendung des transparenten Rahmenmusters nicht mehr. Verwenden Sie in dem Falle das auf Papier gedruckte Rahmenmuster und realisieren Sie die Scharfstellung dadurch, dass die gesamte helle Rechteckfläche des Objekts (30 mm x 23 mm) als Bild mit scharfem Rand erkennbar ist. Bestimmen SIe die Brennweite als Mittelwert der beiden Messungen.

4. Kombinieren Sie die Zerstreuungslinse mit der genau vermessenen Sammellinse L6 zu einem Linsensystem, indem Sie die beiden hintereinander in den Linsen-Doppelhalter montieren. Mit diesem Abbildungssystem erzeugen Sie nun eine Reihe von scharfen Abbildungen (2 vergrößernde und 2 verkleinernde), bei denen Sie die Gegenstandsweite über einen möglichst großen Bereich variieren. Messen Sie bei jeder Abbildung die Gegenstandsweite x (relativ zur Ablesemarke am Reiter des Linsensystems) und den Abbildungsmaßstab. Benutzen Sie für letztere Messung als Objekt das transparente Rahmenmuster für vergrößernde und das auf Papier gedruckte Rahmenmuster für verkleinernde Abbildungen und fangen Sie das Bild auf der Mattscheibe mit cm-Skala auf. Bestimmen Sie durch eine geeignete Auftragung der Datenpaare (mm-Papier) die Brennweite des Linsensystems. Bestimmen Sie aus der Brennweite des Linsensystems und der schon zuvor gemessenen Brennweite der Sammellinse L6 die Brennweite der beteiligten Zerstreuungslinse.

6.2 Untersuchung von Linsenfehlern

Die Annahme, dass alle Strahlen parallel zur optischen Achse sich im Brennpunkt schneiden ist nur für *achsennahe* Strahlen gerechtfertigt. Eine genaue Betrachtung zeigt, dass Lichtstrahlen mit größerem Abstand von der optischen Achse stärker gebrochen werden und die Brennebene damit näher an die Linse rückt. Diesen Effekt bezeichnet man als sphärische Aberration. Diese kann veranschaulicht werden, indem man mit geeigneten Blenden einmal nur achsennahe Strahlen zur Abbildung verwendet und das andere Mal nur achsenferne Strahlen.

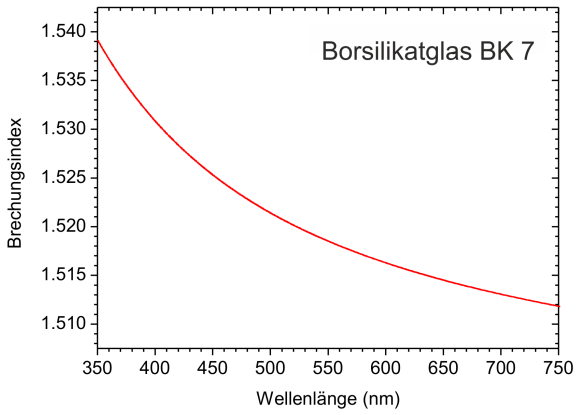

Abbildung 8: Dispersionskurve für BK7 Glas.

Ebenso ist die Annahme eines über den gesamten (sichtbaren) Spektralbereich konstanten Brechungsindex nicht exakt gültig. Tatsächlich zeigen die meisten Materialien (BK7-Glas ist beispielsweise ein weit verbreiteter Standard für Glaslinsen) eine mehr oder minder starke Dispersion, d.h. der Brechungsindex hängt von der Wellenlänge ab (siehe Abb. 8). Diese chromatische Aberration können Sie sichtbar machen, indem Sie einzelne Lichtfarben herausfiltern und damit eine Abbildung darstellen.
Astigmatismus kommt zustande, wenn die lichtbrechende Oberfläche keine einheitliche Krümmung (in Bezug zur optischen Achse) aufweist. Dadurch unterscheidet sich die Brechung in verschiedenen Ebenen und eine scharfe Abbildung ist nicht mehr möglich.

6.2.1 Sphärische Aberration

Bilden Sie das auf Papier gedruckte Rahmenmuster mit der Linse L1 (hinterer Schacht des Doppel-Linsenhalters) im Abbildungsmaßstab 1:1 auf die Mattscheibe ab und bestimmen Sie die Gegenstandsweite der Abbildung. Stellen Sie nun zusätzlich die Irisblende vor die Linse in den Strahlengang, um möglichst nur Achsennahe Strahlen für die Abbildung zuzulassen. Stellen Sie durch Nachstellen der Bildweite die Abbildung erneut scharf und messen Sie die Bildweite. Berechnen Sie daraus mit Hilfe der Abbildungsgleichung die Brennweite der Linse für achsennahe Strahlen.
Ersetzen Sie nun die Irisblende durch die Ringblende (Linsenfassung mit Abdeckkappe).Damit werden achsennahe Lichtstrahlen ausgeblendet und nur achsenferne Strahlen für die Abbildung verwendet. Bestimmen Sie analog wieder die Brennweite für achsenferne Strahlen.

6.2.2 Chromatische Aberration

Benutzen Sie als Objekt das Lochgitter (elektrochemisch in Blech geätzte Löcher auf einem quadratischen Gitter hinter einer Streufolie aus Papier), das nun ebenfalls mit der Linse L1 im Abbildungsmaßstab 1:1 auf die Mattscheibe abgebildet wird. Fixieren Sie Gegenstand und Linse!

1. Bringen Sie den roten Farbfolienfilter vor dem Objekt sowie die Irisblende im Doppel-Linsenhalter vor der Linse zusätzlich in den Strahlengang. Um die Abbildung mit hoher Empfindlichkeit scharf zu stellen, entfernen Sie die Mattscheibe und betrachten Sie stattdessen das Bild mit der Linse OBM (f = 1,5 cm) als Lupe. Die geringe Tiefenschärfe bei dieser Verwendung der Linse als Lupe erlaubt die Bestimmung der Bildebene für die Abbildung mit L1 mit hoher Genauigkeit. Stellen Sie das Bild durch Verschiebung der Linse OBM scharf und bestimmen Sie die Position der Linse OBM (Ablesemarke am Reiter des Linsenhalters).

2. Wiederholen Sie das Experiment entsprechend mit dem blauen Farbfolienfilter.

3. Bestimmen Sie die Verschiebung der Bildweite zwischen rotem und blauem Bild.

4. Berechnen Sie aus der Bildweitenverschiebung die Differenz der Brennweiten von rotem und blauem Licht.

5. Das rote Licht entspricht in etwa einer Wellenlänge von 650 nm und das blaue einer Wellenlänge von etwa 450 nm. Vergleichen Sie die Differenz der beiden Brennweitewerte mit Abbildung 8.

6. Wiederholen Sie das Experiment mit beiden Farbfiltern mit dem Achromaten A anstelle der Linse L1 und vergleichen Sie auch dafür die Bildweiten für rotes und blaues Licht!

6.2.3 Astigmatismus

Astigmatismus können sie simulieren, indem Sie die Abbildungslinse aus der Senkrechten zur optischen Achse drehen. Astigmatismus (oder Stabsichtigkeit) am Auge entsteht z.B. durch eine axiale Hornhautverkrümmung und kann durch sogenannte Zylinderlinsen korrigiert werden.

6.3 Simulation des Auges

6.3.1 Das emmetrope Auge

Das normalsichtige, entspannte Auge simulieren Sie, indem Sie mit der Linse L1 (in Kombination mit der Blende) oder L3 eine verkleinerte Abbildung (bei ca. 140 cm Gegenstandsweite) auf der Mattscheibe

erzeugen. Verwenden Sie als Objekt dabei das auf Papier gedruckte Rahmenmuster, bestimmen Sie die Bildweite und überprüfen Sie Ihr Ergebnis anhand der Abbildungsgleichung

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g} \tag{4}$$

Den Gegenstand bringen Sie anschließend in ca. 40 cm Schritten näher an die Linse. Da die Bildweite festliegt und Sie die Gegenstandsweite verkleinern (also 1/g vergrößern), muss demnach die Brechkraft der (Augen)linse entsprechend erhöht werden. Dies erreichen Sie durch geeignete zusätzlich Linsen, die Sie in die Doppelhalterung stecken können. (Da nur eine endliche Anzahl von Linsen zur Verfügung steht, müssen Sie u.U. die Gegenstandsweite etwas variieren um wieder ein scharfes Bild zu erhalten). Die Brechkräfte der beiden Linsen addieren sich zu

$$\frac{1}{f_{ges}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 \cdot f_2} \tag{5}$$

wobei berücksichtigt wird, dass beide Linsen keine gemeinsame Hauptebene mehr haben können, sondern im Abstand d sitzen. Letzterer Term kann vernachlässigt werden, wenn gilt, dass $d \ll f_1, f_2$ (die Linsen als sehr eng zusammen stehen).

6.3.2 Das myope Auge

Das Auge bei der Kurzsichtigkeit ist im Vergleich zum normalsichtigen Auge zu lang. Dies simulieren Sie, indem Sie die Mattscheibe um ca. 5-10 mm weiter weg stellen. Versuchen Sie nun mit den Linsen L21 (2 dpt) bzw. L22 (1 dpt) wieder ein scharfes Bild zu erhalten. Dazu müssen Sie die Mattscheibe u.U. leicht nachjustieren. Messen Sie die Bildweite und überprüfen Sie das Ergebnis mit der Abbildungsgleichung 4 und Gleichung 5.
Entfernen Sie die Linsen L21 bzw. L22 und bringen Sie das Objekt näher an die Linse. Ab welchem Abstand (welcher Bereich) erhalten Sie ein „scharfes“ Bild? Was bedeutet dies für den Nahpunkt beim myopen Auge?

6.3.3 Das hyperope Auge

Das weitsichtige Auge ist zu kurz und die Brechkraft der Linse reicht nicht aus, ein scharfes Bild zu erzeugen. Stellen Sie dazu die Mattscheibe 5-10 mm näher an die Linse und versuchen Sie mit der Linse L23 (2 dpt) ein scharfes Bild zu erzeugen.

6.3.4 Das presbyope Auge

Machen Sie sich anhand der vorangegangen 3 Versuche klar, welche Konsequenzen Presbyopie mit sich bringt und wie diese geeignet korrigiert werden kann.